

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální biologie rostlin

Obecná biologie



Hana Janů

Fyziologické funkce stromů v městských ekosystémech

Tree physiological functions in urban ecosystems

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc.

Konzultant: Mgr. Zuzana Lhotáková, PhD.

Praha 2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 7. 5. 2018

Podpis:

Poděkování:

Na tomto místě chci poděkovat svému školiteli, doc. RNDr. Janu Pokornému, CSc., za nadšení pro věc a velkou inspiraci. Dále mé velké díky patří konzultantce, Mgr. Zuzaně Lhotákové, PhD., za udržení textu ve smysluplné rovině. Děkuji všem blízkým a týmu laboratoře za podporu a pomoc.

Abstrakt:

Zvyšující se teplota ve městech a vlny horka jsou stále větším tématem. Ruku v ruce s nimi jde i sucho, vyčerpání půdy a znečištění životního prostředí. Tyto faktory mají negativní dopad nejen na život a zdraví lidí.

Velké procento populace žije ve městech, a tak má na člověka jeho prostředí nezanebatelný vliv. Vystavěním městské plochy člověkem nastaly v krajině, tocích vody i energie změny, které mají dopad na ekosystémy v lokálním i globálním měřítku. Systémy, které se snaží dosáhnout rovnováhy, jsou posouvány do nestabilních extrémů.

Vegetace byla v minulosti v tomto kontextu často zanedbávaná a ve městech téměř nežádoucí. Její pozitivní vliv na prostředí, ve kterém žije člověk, je i přes nemožnost finančního ohodnocení, jasně viditelný.

Cílem práce je shrnout poznatky o fyziologických funkcích stromů v městských ekosystémech a jejich vlivu na biotické i abiotické faktory, jako je například biodiverzita, zdraví lidí, oběh vody, znečištění, srážky a teplota vzduchu i povrchu.

Klíčová slova:

sluneční energie, mikroklima a mezoklima, chlazení transpirací, srážky, oběh vody, teplota vzduchu, povrchová teplota

Abstract:

Increasing of temperatures in the cities and heat waves becomes more and more important topic nowadays. They are followed by drought, soil depletion and environmental pollution. These factors have a negative impacts not only on human health and life.

A lot of people lives in cities and therefore the urban environment has an considerable influence on them. The urban land built by human causes changes in water and energy flows and they influence ecosystems in local even global scale. Systems want to acquire the equilibrium, but they are shifted into the unstable extremes.

Vegetation was in this context overlooked in the past and almost removed from human's concrete residences. Its positive impact on the environment is obvious, although financial evaluation is not directly possible.

The aim of the present review is to summarize knowledge of tree physiological functions in urban ecosystems and their impact on biotic even abiotic factors like biodiversity, human health, hydrological cycle, pollution, precipitation and temperature.

Key words:

solar energy, microclimate, mesoclimate, transpiration, precipitation, water cycle, air temperature, surface temperature

Seznam použitých zkratk:

UHI – tepelný ostrov města (urban heat island)

UV – ultrafialové záření (ultraviolet)

VIS – viditelné záření (visible)

IR – infračervené záření (infrared)

C4 – C4 cyklus (Hatch-Slack cycle)

CAM – metabolismus kyselin u tučnolistých (crassulacean acid metabolism)

ET – evapotranspirace (evapotranspiration)

LAI – index listové plochy (leaf area index)

EC – elektrokonduktivita (electroconductivity)

PM₁₀ – polétavý prach (particulate matter)

TSP – celkové suspendované částice (total suspended particles)

Obsah

1	Úvod	8
2	Vodní režim rostlin a důležité fyzikální vlastnosti vody	10
2.1	Fyzikální vlastnosti vody	10
2.2	Příjem a transport vody rostlinou.....	10
3	Biofyzikální faktory ovlivňující energetickou bilanci zemského povrchu.....	12
3.1	Distribuce slunečního záření	12
	Albedo	14
	Ohřívání povrchu	15
	Zjevné teplo.....	15
	Latentní teplo	15
	Fotosyntéza	16
3.2	Evapotranspirace	16
	Evaporace	17
	Transpirace	18
3.3	Atmosférická výměna plynů	19
	Vertikální výměna vodní páry.....	20
	Biotická pumpa.....	20
	Globální cyklus uhlíku, vliv na klima a teplotu	22
4	Stromy ve městě.....	22
4.1	Funkce stromů ve městě	23
	Stínění, chlazení, zadržování vody a konvektivní srážky	23
	Škody způsobené kořeny a prevence	27
	Stromy, jejich fyziologický stav a městské prostředí.....	28
	Úspora energie	31
	Znečištění vzduchu a hluk	31
	Biodiverzita.....	31
4.2	Stromy a lidé	32
5	Závěr	33
6	Seznam zdrojů a použité literatury	35
	Internetové zdroje.....	39

1 Úvod

Nárůst lidské populace na planetě byl zrychlen především v dobách průmyslové revoluce (Qiu et al., 2013). Zvyšující se lidská populace, intensifikace zemědělství a vyšší výnosy vedly k tomu, že se čím dál tím více lidí stěhuje do měst. Proces, kdy se lidé stěhují do měst, se nazývá urbanizace.

Urbanizace je spojena s budováním měst a míst, kde může bydlet větší množství lidí a žít na co nejmenších plochách. Počet obyvatel, žijících ve městě, rapidně vzrostl. Z 13 % v roce 1900 na 46 % v roce 2000, odhady na další nárůst jsou kolem 69 % v roce 2050 (Qiu et al., 2013). Každý člověk potřebuje místo pro své bydlení, pro nákup potravin a další základní potřeby. Trendem se stala automobilová osobní doprava a globalizace dovozem zboží. Pro množství automobilů a nákladních aut je potřeba místo na zaparkování a zpevněné cesty pro dopravu. Se způsobem života souvisí množství obytných domů, kanceláří, parkovišť, chodníků a silnic, které slouží k životu a dopravě ohromného množství lidí a věcí.

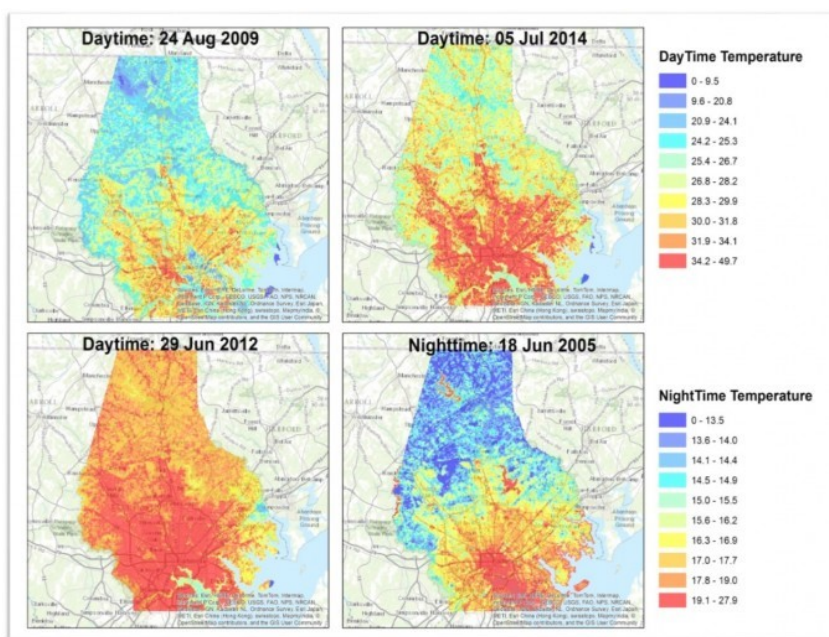
To všechno vede k nahrazení ploch dříve zelených plochou zastavěnou (Tayyebi et al., 2018). Různé typy povrchů se liší svými vlastnostmi a vytváří zcela odlišné prostředí. To se projevuje především změnami bilance sluneční energie. Mění se její toky, zastavěné plochy nezadržují dešťovou vodu a za slunného počasí se zvyšuje povrchová teplota.

Fenomén tepelného ostrova (Urban Heat Island effect) je výsledkem těchto změn povrchu a jejich kumulace na jednom místě. Povrchy jsou nepropustné pro vodu, přehřívají se slunečním zářením a pak samy vyzařují tepelné záření (viz 3.1 Distribuce slunečního záření). Často mají nízké albedo (odrazivost). Všechny tyto vlastnosti vedou ke vzniku zjevného tepla (sensible heat), které ohřívá vrstvu vzduchu nad povrchem. Z povrchu se vypařuje všechna voda, která dosud neodtekla, a stoupá s ohřátým vzduchem. A tak jsou povrchy úplně suché, rozehráté a sálá z nich obrovské teplo (Tayyebi et al., 2018; Zhang and Liang, 2018).

Takto vzniklé mikroklima, které je suché a teplé, má negativní vliv na člověka, zvyšuje úmrtnost, narušuje soustředění, zvyšuje znečištění vzduchu a negativně ovlivňuje celkové zdraví (Tayyebi et al., 2018; Zuvela-Aloise et al., 2018). Přehřátá města spotřebovávají vysoké množství energie na chlazení budov a to má vliv i na celkovou změnu globálního klimatu (viz 4 Stromy ve městě) (Redon et al., 2017; Zhang and Liang, 2018; Zuvela-Aloise et al., 2018).

Urban Heat Island (dále UHI) effect popisuje jev, kdy je (za stejných podmínek) ve městě vyšší teplota, než v okolních příměstských a venkovských areálech (Obrázek 1). Tento jev je známý už ze sedmdesátých let 20. století (Oke, 1973). UHI efekt je ovlivněn mnoha okolnostmi. Závisí na využití plochy a energetické výměně s tím spjaté (Naeem et al., 2018). Na typu povrchu, který ovlivňuje komunikaci s atmosférou, zadržování srážek a evaporaci (příp. evapotranspiraci).

Město je vystavěno z tmavých a vodě nepropustných povrchů, jako je beton, asphalt, střešní kryty. Tyto povrchy absorbují hodně energie ze slunečního záření a ta se přeměňuje na energii tepelnou. Povrchy se zahřívají. Protože v sobě nezadržují vodu, nemají způsob, jak by se ochladily, a tak teplo vyzařují (disipují) do okolí a ohřívají vzduch (Lee et al., 2014; Pokorný, 2001). Vzniká tím množství zjevného tepla a teplota celého areálu města stoupá (Tayanc and Toros, 1997). Suchý teplý vzduch stoupá nad město a i z okolí vytahuje vláhu, která krajinu ochlazuje skrze tok latentního tepla. Tím se vysušuje městské prostředí a vznikají teplotní extrémy. Extrémní vlny horka a mrazivé zimy beze srážek. Zároveň ve městě vzniká díky dopravě a energetické spotřebě velká koncentrace skleníkových plynů, která také přispívá k oteplení. Pro ochlazení na přijatelné teploty lidé používají klimatizaci, což vede k ochlazení vnitřních prostor, ale ohřátí vnějších, další spotřebě energie, a tím vzniká pozitivně-zpětnovazebný kruh (Taleghani et al., 2015).



Obrázek 1: Rozložení teplot ve městě a v jeho okolí. Přes den i v noci má město vyšší teplotu, vzniká UHI efekt. Převzato a upraveno dle: (Nathalie Shanstrom (2016) [online])

Vzniklé podmínky závisí například i na zeměpisné šířce a nadmořské výšce města, podnebí, na rychlosti větru, orientaci budov a podobně. Závisí ale i na snadno ovlivnitelných faktorech, jako je velikost ploch zarostlých vegetací, hospodářsky využívaných a vodních ploch (Cheung and Jim, 2018; Gunawardena et al., 2017).

Z výše popsaných důvodů je žádoucí změnit životní prostředí města a zlepšit jeho podmínky ke komfortnímu životu tak, aby mohlo regulovat energetickou bilanci dopadajícího záření, zadržovalo vodu a nepřehřívalo se. V kapitolách Biofyzikální faktory ovlivňující energetickou bilanci zemského povrchu a Stromy ve městě se budu věnovat různým vlastnostem povrchů, jejich výhodám a nevýhodám z pohledu fyzikálních vlastností, jako je absorpce záření, evaporace vody, regulace teploty, a pokusím se shrnout různé přístupy ke zmírňování negativních dopadů změn povrchu a zaměřím se na funkci vegetace v tomto kontextu, zejména na evapotranspiraci.

2 Vodní režim rostlin a důležité fyzikální vlastnosti vody

2.1 Fyzikální vlastnosti vody

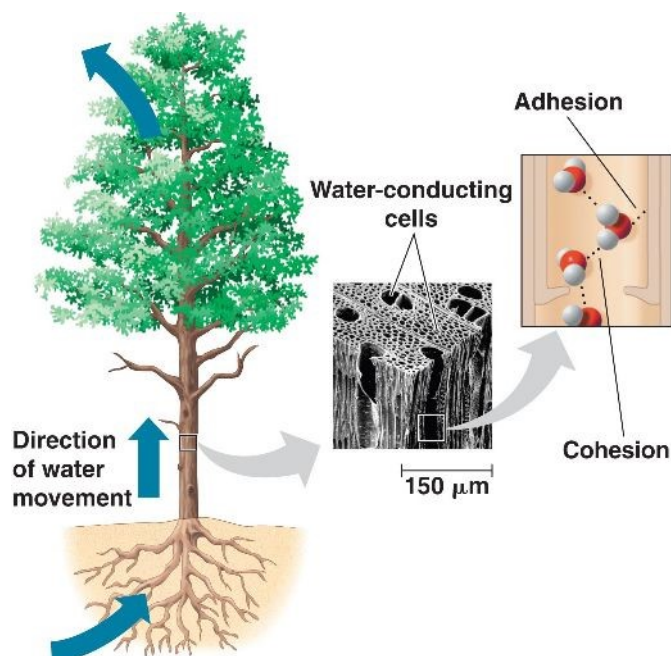
Voda a její unikátní fyzikální vlastnosti jsou důležité pro život na Zemi. Mezi ty, které ovlivňují život a fyziologické funkce rostlin, patří například koheze, hydrofobní interakce, tvoření vodíkových vazeb, silně polární charakter, adheze, chemická inertnost, stálý objem, vysoké specifické teplo, tepelná vodivost a vysoké molární teplo fázového přesunu. Plní tak nezastupitelnou roli v rostlinném metabolismu, struktuře rostlinného těla a fyziologické funkci rostlin. Voda prostupuje a vyplňuje podstatnou část rostlin, vytváří tak prostor například pro rozpouštění a transport látek (reakční agens), hydrostatický tlak (turgor) a termoregulaci (transpirace). V rostlinném systému i mimo něj se voda pohybuje především hromadným tokem (konvekci) a difúzí či osmózou přes selektivní bariéry.

2.2 Příjem a transport vody rostlinou

Rostliny čerpají půdní roztok, vodu společně s důležitými minerálními látkami a živinami, kořeny. Dostupnost vody a směr jejího toku v systému půda – voda – atmosféra je řízen gradientem vodního potenciálu, množstvím srážek a vodní kapacitou půdy. Rostlina může pro

čerpání půdního roztoku zvýšit velikost kořenového systému, především jeho povrch: větvením, kořenovým vlášením a také díky symbióze s houbami (mykorrhiza). Zároveň tím zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu. Rozsah a růst podzemní biomasy závisí na podmínkách prostředí a typu půdy. Kořeny rostou pozitivně gravitropicky, díky sedimentaci statolitů ve sloupku kořenové čepičky, aktivně vyhledávají vodu a minerální látky potřebné k růstu (např. dusík, fosfor). V místě zvýšené koncentrace látek potřebných k životu rostliny v půdním profilu je kořenový systém značně rozvětven a má větší povrch pro příjem těchto látek.

Voda je přijímána spolu s rozpuštěnými ionty povrchem kořenu, dále je vedena symplastickými či apoplastickými drahami, do endodermis. Zde musí projít přes plazmatickou membránu, protože nepropustný proužek v buněčné stěně impregnovaný suberinem a ligninem (Casparyho proužek) zamezuje apoplastickému průchodu. Dále je voda vedena do dřevní části vodivých pletiv (xylém). Její průchod membránou rostlinných buněk je zjednodušen akvaporiny, specificky propustnými póry pro molekuly vody, kde její transport probíhá pasivně, bez spotřeby energie, pouze na základě osmózy. Do nadzemní části rostliny je voda vedena především xylémovými vodivými pletivy až do listu (Obrázek 2). Floémovou částí vodivých pletiv zásobuje rostlina heterotrofní orgány asimiláty, které jsou vytvářeny především v zelených částech rostliny.



Obrázek 2: Voda je přijímána kořeny stromu a dále vedena cévními elementy (water-conducting cells) až do listů, kde probíhá transpirace. Tento pohyb je možný díky vodivým pletivům a fyzikálním vlastnostem vody, jako jsou adheze a koheze. Převzato z: (Cohesion of water [online])

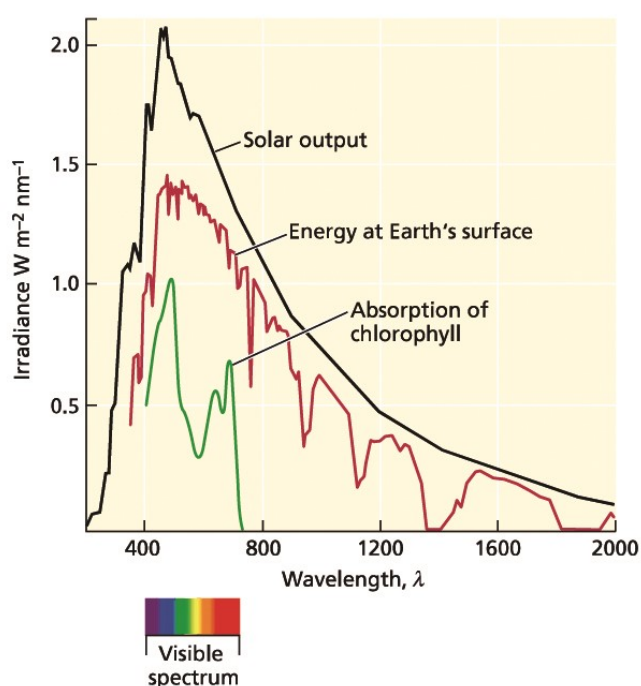
3 Biofyzikální faktory ovlivňující energetickou bilanci zemského povrchu

Fyzikálními faktory jsou myšleny fyzikální jevy, které transportují a transformují energii. Například evaporace, konvekce, pohyby vzdušných mas, absorpce a disipace energie. Biologické faktory zahrnují funkce biosféry a její podíl na tocích energie, jako procesy transpirace a fotosyntézy.

3.1 Distribuce slunečního záření

Sluneční záření je jedinečný zdroj energie pro planetu Zemi. Dodává energii pro fyzikální i biochemické děje, jako jsou proudění vzduchu, vypařování vody, vznik oblačnosti, fotosyntéza a další.

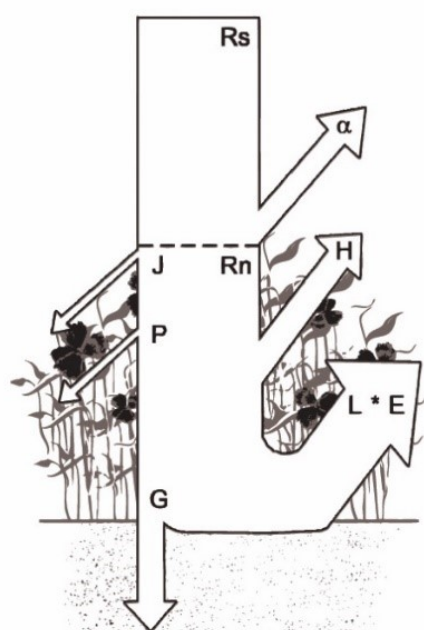
Přibližně dopadá na svrchní vrstvu atmosféry 1360 W/m^2 , což je hodnota solární konstanty. Je přibližná, neboť závisí na elipsoidní oběžné dráze Země okolo Slunce (údaje se liší, většinou mezi $1321 - 1412 \text{ W/m}^2$). Solární konstanta je množství kolmo dopadajícího záření na jednotku plochy – 1 m^2 . Spektrum slunečního záření lze rozdělit podle vlnových délek na gama záření, rentgenové, ultrafialové (UV), viditelné – světlo (VIS), infračervené (IR), radiovlny a mikrovlny.



Graf 1: Energetický tok (Irradiance) v závislosti na vlnové délce (Wavelength) záření emitovaného sluncem (černá křivka) a energie dopadající na povrch Země (červená). Absorpční maxima fotosyntetických pigmentů chlorofylu a+b (zelená křivka). Mezi vlnovými délkami 400 a 800 nm je vyznačeno viditelné spektrum. Převzato a upraveno dle: (Taiz and Zeiger, 2002).

Na povrch Země dopadá průměrně 342 W/m^2 , což je asi čtvrtina hodnoty solární konstanty. Tuto hodnotu pojmenováváme globální radiací. Její velikost závisí například na průchodnosti atmosféry a jejím složení (oblačnosti, množství plynů – vodní páry apod.), na množství částic, kterými se záření rozptýlí nebo odrazí (znečištění prachovými částicemi), na úhlu, pod kterým záření dopadá a na dalších faktorech. Největší podíl záření ze slunce má vlnovou délku kolem 475 nm , to je asi 48 % ve VIS a méně než 7 % v UV (Graf 1). Záření, které dopadne po průchodu atmosférou na povrch Země, se svým spektrálním složením odlišuje od záření, které dopadá na horní vrstvu atmosféry. Je to díky selektivní propustnosti atmosféry. Atmosféra je dobře propustná pro VIS a radiové oblasti spektra, ostatní oblasti více či méně filtruje – díky ozonu UV oblast a obsahem vodní páry IR oblast spektra (Pokorný et al., 2014).

Energie, která pronikne skrze atmosféru a dopadne na zemský povrch, se rozděluje do dalších energetických toků (Obrázek 3) a lze popsat jako energetická nebo tepelná bilance daného povrchu:



- R_s globální radiace (global radiation)
- R_n čistá radiace (net radiation)
- J hromadění tepla v biomase (heat storage)
- P fotosyntéza (photosynthesis)
- G tok tepla do půdy (ground heat flux)
- α albedo
- H zjevné teplo (sensible heat flux)
- $L*E$ latentní teplo výparu* evapotranspirace (latent heat of vaporation x evapotranspiration)

Obrázek 3: Energie slunečního záření dopadající na povrch Země je dále dělena do různých energetických toků. Procentuální zastoupení závisí hlavně na typu povrchu a jeho fyzikálních vlastnostech. Převzato a upraveno dle: (Sara-patka et al., 2010)

Část energie je odražena povrchem, na který dopadne. To závisí na fyzikálních vlastnostech povrchu a také na intenzitě a spektru přicházejícího záření. Pro definování odrazivosti se užívá termín albedo. Albedo (bělost) je poměrová veličina, která říká, jaká je odrazivost povrchu. Jde o poměr odraženého záření ku dopadajícímu záření na jednotku plochy. Čím více těleso nebo povrch záření absorbuje, tím je albedo nižší. Jeho hodnoty se pohybují v intervalu 0-1. Albedo je proměnlivé během sezóny. Záleží totiž na úhlu, pod jakým záření na povrch dopadá. Pro kolmé záření platí, že absorpce povrchu je maximální. V temperátních oblastech severní polokoule je, díky eliptické oběžné dráze Země, nejvyšší podíl dopadajícího slunečního záření v létě a nejmenší během zimy (Coakley, 2003). Hodnota albeda závisí hlavně na typu materiálu. Vegetace odráží okolo 20 %, beton podle barvy až 50 %, voda méně než 10 % (Sarapatka et al., 2010). Teplota povrchu úzce souvisí s albedem. Povrch, který absorbuje hodně záření, se zahřívá. Poté zahřívá i své okolí vlastním vyzařováním (Box 1). Energie vyzařovaná tělesem je úměrná čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty, proto záleží na tom, jaké teploty ohřátý povrch dosáhne.

Stefanův-Boltzmannův zákon:

Intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa

$$I = \sigma T^4,$$

kde I je celková intenzita záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

σ Stefanova-Boltzmannova konstanta = $5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ a T termodynamická teplota [K].

Box 1: Stefanův-Boltzmannův zákon – popisující celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa

Povrchy se liší svými fyzikálními vlastnostmi, které ovlivňují hodnoty albeda. Sníh má vysoké albedo, odráží větší část záření (v literatuře uvedené hodnoty mezi 0,25 a 0,66) (Bonan, 2008), než například město (v literatuře uvedené hodnoty mezi 0,25 a 0,15) (Akbari et al., 2009), jehož povrchy jsou často tmavé a více absorbují. Sníh tedy poskytuje ochlazení svého

okolí nejen vlastním vyzařováním, ale i odrazem dopadajícího záření. Naopak je tomu u tmavých povrchů (Betts, 2000; Coakley, 2003). Lidská činnost výrazně mění zemský povrch. Odlesnění, zemědělství, těžba, přehrady, města – to vše má díky albedu vliv na lokální a možná i globální změny teploty (Bonan, 1997).

Ve městě díky nepropustným povrchům s nízkým albedem, jako jsou chodníky, parkoviště, silnice a střechy, teplota stoupá. Podle některých autorů by pomohlo ke snížení teploty a zmírnění efektu tepelného ostrova zvýšení albeda použitím vysokoreflektivních materiálů na střechy a fasády domů (Zuvela-Aloise et al., 2018). Může se jednat o bíle zbarvené membrány, které by pokrývaly celé střechy a stěny, anebo o bíle zbarvené šindele a tašky, pokrývající svažující se střechy (Bretz et al., 1998). Jako další způsob ovlivnění teploty se nabízí zvýšení zastoupení vegetace a zelených ploch ve městě. Změna povrchu z přirozených ekosystémů na město albedo sníží, a tak zvýší jeho teplotu. Vegetace je také často tmavá, zelené rostliny absorbují především ve spektru fotosynteticky aktivního záření, a tak mají albedo relativně nižší (Jackson et al., 2008), avšak pro okolí mají díky biofyzikálním vlastnostem celkově chladivější efekt, než rozežhátá asfaltová plocha. Rostliny svou teplotu a výdej vody navíc samy regulují (viz. 3.2 Evapotranspirace). Zeleň ve městě může být v podobě parků, travnatých ploch, samostatných stromů a zelených střech a fasád.

Ohřívání povrchu

Další část záření pohlcené povrchem je přeměněno na kinetickou energii částic (teplo). Zářením se tedy ohřívá země. Absorbance závisí na vlastnostech povrchu - jeho tepelné vodivosti, obsahu vody, optických vlastnostech, měrné tepelné kapacitě půdy, atd.

Zjevné teplo

Část energie se projeví jako zjevné teplo. Sluneční záření ohřívá povrch i vzduch nad ním, který stoupá turbulentními proudy. Toto teplo vnímáme jako zjevné teplo (sensible heat), cítíme ho a měříme teploměrem.

Latentní teplo

Část se projeví jako latentní teplo, neboli skupenské, to je (tepelná) energie potřebná ke změně skupenství. V přírodě se nejčastěji jedná o výpar vody, ke kterému energii dodává sluneční záření. Při výparu se nezvyšuje teplota, neboť energie je spotřebována na změnu skupenství. Teplo odváděné vodní párou z povrchu do atmosféry se uvolní až tehdy, když se teplý

vzduch ochladí vysoko nad zemí a vodní pára zkondenzuje na kapičky tvořící oblaky. Tak se vlhkost neztratí, zkondenzuje a časem spadne opět na povrch v podobě srážek. Tepelná energie se tak nehromadí na jednom místě a nezpůsobuje přehřátí, ale dostane se na relativně chladnější místa, kde se uvolní, a tím oteplí své okolí a vyrovná tím obě teploty. Tento přenos energie nefunguje jen místně, ale i časově. Přenáší se například z teplého dne, do chladné noci. Kondenzaci můžeme pozorovat jako vertikální srážky – rosu nebo mlhu. Vyrovnávají se tak extrémy. Na poušti, kde chybí voda, je přes den veliké horko a přes noc klesají teploty pod 0°C.

Fotosyntéza

Na fotosyntézu je spotřebováno velice malé množství slunečního záření (do 1 % dopadajícího záření), především to z viditelného spektra. Rostlina jej absorbuje hlavně díky zelenému barvivu, chlorofylu, a to ve dvou oblastech vlnových délek: kolem 480 nm a dále kolem 680 nm. Rostliny obsahují i další barviva – jako jsou karotenoidy (karoteny a xantofyly), které pohlcují záření ve vlnových délkách v rozmezí 300 - 500 nm.

3.2 Evapotranspirace

Rostliny jsou součástí povrchu Země. Ze záření dopadajícího za rok na povrch použijí asi 1 % jako energii pro fotosyntézu, která zajišťuje primární produkci na planetě (Obrázek 4). Další energie je spotřebována na ohřev rostlinného těla (a povrchu pod ním) a největší část, 21 % - 22 % z dopadajícího záření na vršek atmosféry, je spotřebována na evapotranspiraci (Qiu et al., 2013). Tento proces lze rozdělit podle fyzikální podstaty na evaporaci – vypařování a transpiraci – výdej vodní páry z povrchu rostliny, zejména přes průduchy.



Obrázek 4: Satelitní snímek ukazující primární produkci vegetace na pevnině. Nejtmavší zelená místa znázorňují bujnou vegetaci, zatímco světlá barva reprezentuje místa s malým pokryvem vegetace, jako jsou sněhem pokryté, kamenité, vysušené či městské povrchy. Převzato z: (Hill, E. (2017) [online])

Evaporace

Proces evaporace – odpařování odčerpává energii dopadajícího záření, pokud je na a v povrchu přítomna voda. Voda pohlcuje energii na změnu z kapalného skupenství na plynné a teplota evaporujícího povrchu se výrazně nemění (Box 2).

Měrné skupenské teplo tání:

Teplo, které přijme 1 kilogram pevné látky, jestliže se za teploty tání celý přemění na kapalinu téže teploty.

Pro vodu je to 334 kJ/kg

Měrné skupenské teplo varu:

Teplo, které přijme 1 kilogram kapaliny, jestliže se za teploty varu celý přemění na plyn téže teploty.

Pro vodu je to 2257 kJ/kg

Box 2: Důležité fyzikální parametry vody pro evaporaci

Molární skupenské teplo je teplo potřebné k fázové změně jednoho molu látky. Fáze se změní v druhou fázi o téže teplotě a tlaku. Jednotkou je joule na mol (J/mol). Voda se odpařuje za všech podmínek (z ledu sublimuje), avšak čím vyšší teplotu má, tím více molekul se dostane do atmosféry v podobě vodní páry. Pokud mají rostliny a půda pod nimi vysoký obsah vody, slunečním zářením se voda vypařuje, tím odebírá tepelnou energii a nezahřívá se tak povrch, jako by tomu bylo u vodě nepropustného povrchu, ze kterého všechna voda snadno steče (Redon et al., 2017).

Díky srážkám se dostává voda do půdy. Čím členitější a perforovanější je povrch (surface roughness), tím více vody v něm zůstane. Vegetace poskytuje velkou plochu povrchu a jeho členitost díky listům. Kolik vody půda udrží, záleží na zrnitosti, pórovitosti, obsahu organických látek a přítomnosti rostlinného pokryvu, na druhu porostu a na výskytu brzdících horizontů nebo vrstev v půdním profilu. Nepropustné a utužené povrchy nepojímají téměř žádnou vláhu a voda z nich odteče pryč (Wu and Chen, 2017). Nestíněný povrch absorbuje záření a zahřívá se. Pokud je suchý, jeho teplota může mnohonásobně převýšit teplotu povrchu vlhkého, neboť z něj není energie odnímána i energetickým tokem latentního tepla při evaporaci (Gunawardena et al., 2017). Povrch zakrytý a stíněný rostlinami nejen dokáže přijmout více vody (voda je dodávána v delším časovém horizontu, a tak nedojde k rychlému přesycení půdy a odtečení přebytku), ale ovlivňuje a reguluje její výdej zpět do atmosféry (Anderson et al., 2011).

Transpirace

Výdej vody rostlinami ve formě vodní páry je transpirace. List vystavený slunečnímu záření část odráží, propouští a část pohlcuje. Pohlcená energie je využita na fotosyntézu a také na ohřev rostlinného těla, zejména vody v něm obsažené.

Vzdušný CO₂, potřebný k fotosyntéze, je otevřením průduchu absorbován, ale také dochází k úniku vodní páry. Výdej vodní páry skrze průduchy se nazývá stomatární transpirace. List vydává vodu i povrchem, na kterém průduchy nejsou. Voda proniká přes kutikulu (kutikulární transpirace). Odpařování vody slouží k ochlazení rostlinného orgánu. Stomatární transpirace je na rozdíl od kutikulární regulovatelná otevřením či zavřením průduchu. Rostliny při otevření průduchů vodu v podobě vodní páry vydávají, snižují tak svou teplotu a zároveň jejím odpařením mohou transpiračním sáním načerpat vodu z půdy, kde jsou potřebné minerální látky a další živiny. Pokud rostlina nemá k dispozici dost vody, jejím ztrátám se snaží nejrůznějšími způsoby vyhnout.

Transpirace je klíčová pro příjem vody kořeny. Voda v celém rostlinném těle vytváří, díky adhezním, kohezním silám a kapilárnímu systému vodivých pletiv, vodní sloupec, který se v nadzemní části odpařuje, tím se posouvá a nasává v podzemní části kapalnou vodu (transpirační sání, kapilární elevace). Je také důležitá pro ochlazení rostliny, rostlina vydává energii díky latentnímu teplu ve vodní páře.

Při nedostatku vody se ale rostlina brání jejím ztrátám různými mechanismy (Anderson et al., 2011). Mezi krátkodobé reakce na nedostatek vody patří např. snížení fotosyntetické aktivity a přivření průduchů (signalizace kyselinou abscisovou), je zbrzděn růst rostliny (Gunawardena et al., 2017). Při dlouhodobějším nedostatku vody rostlina syntetizuje více kutikulárních vosků, aby zabránila vypařování vody pokožkou, zároveň růst kořenů je namířen do větší hloubky. K příkladům dlouhodobých, evolučních přizpůsobení patří pokrytí rostlin trichomy, které odráží sluneční záření nebo zachytávají vzdušnou vlhkost. Morfologické jevy zahrnující zanořené průduchy a fyziologické přizpůsobení metabolismu. Metabolismus C4 odděluje fáze fotosyntézy prostorově a CAM časově, a tak se mohou průduchy k čerpání CO₂ otevírat přes noc, kdy je ztráta vody minimalizována tím, že rostlina není vystavena slunečnímu záření.

Díky evapotranspiraci mají rostliny velký vliv na své okolí. Mění vlastnosti povrchu – stíní, zadržují vodu, zvyšují plochu povrchu a lépe komunikují s atmosférou, regulují výpar a snižují teplotu díky latentnímu teplu (Anderson et al., 2011; Zhang et al., 2018). Ovlivňují tak mikroklima. I jen samostatně stojící strom zlepšuje klima svého nejbližšího okolí (Bala et al., 2007; Qiu et al., 2013). Tyto fyziologické funkce je možné využít při plánování a stavbě měst, kde UHI je a bude stále větším problémem, zvláště s ohledem na celkové oteplování klimatu (Cheung and Jim, 2018; Qiu et al., 2013; Tayyebi et al., 2018).

3.3 Atmosférická výměna plynů

Pohyb vzdušných mas je poháněn energií ze slunce. Záření ohřívá povrch, z něj je energie distribuována různými toky. Pokud vrstva vzduchu nad povrchem přijímá energii za změny teploty, jedná se o zjevné teplo (sensible heat). Pokud není změněna teplota látky, ale její skupenství, jde o latentní, neboli skryté, teplo. Latentní tok energie lze uskutečnit díky vodě – vodní páře. Voda energii vstřebává, ale nedejde k jejímu zahřátí, nýbrž ke změně skupenství, to

znamená, že kapalná voda změní skupenství na plyn, vodní páru. Teplý vzduch má menší hustotu, než vzduch studený, a tak proudí směrem vzhůru, vytlačován studenějším vzduchem. Tak vzniká energetická výměna mezi povrchem a atmosférou (Wu and Chen, 2017).

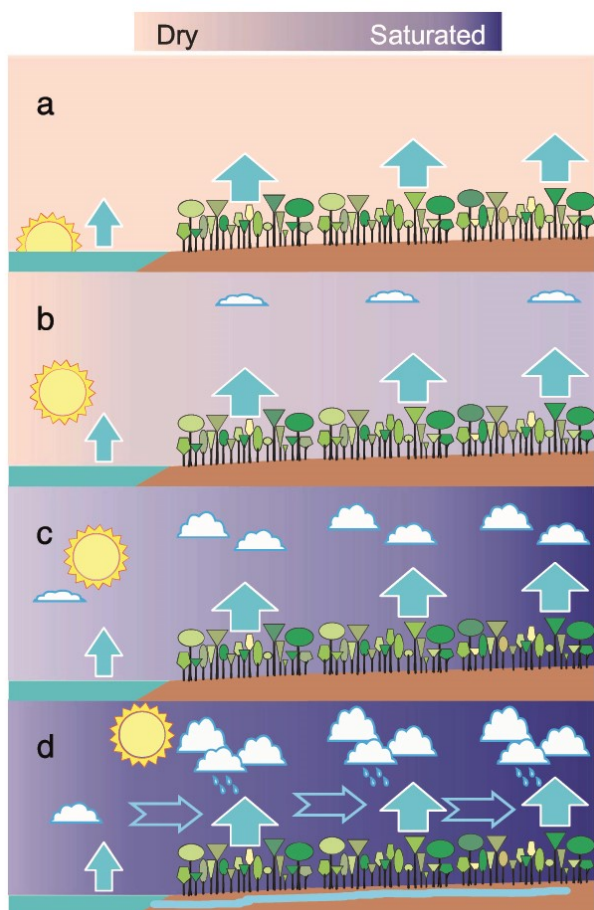
Vertikální výměna vodní páry

Teplý vzduch s obsahem vodní páry stoupá a přemísťuje se tak do míst, kde je již teplota nižší. Když se vzduch ochladí, nepojme už tolik vodní páry a dochází ke kondenzaci vody na malé kapičky. Zároveň se tím uvolní zpět latentní teplo (kondenzační) a ohřívá se tak dříve mnohem studenější atmosféra. Kondenzaci usnadňují kondenzační jádra – prachové částice, nabitě molekuly. Malé kapičky vytváří oblaka. Poté, co se kapky zvětší další kondenzací natolik, že se neudrží svou vahou v atmosféře, padají na zem v podobě konvektivních srážek (Zhang et al., 2009).

Výše popsany tok energie zmírňuje teplotní extrémy rozehřátého povrchu. Základním předpokladem pro to, aby mohl fungovat, je dostatek vody na daném povrchu (Anderson et al., 2011). Pro vodu nepropustná plocha ve městě, (jako jsou chodníky, dláždění, beton, asfalt, parkoviště, silnice) neobsahuje volnou vodu, která by se mohla vypařit, a tím umožnit tok latentního tepla (Georgescu et al., 2015). Pokud na takovou plochu dopadnou srážky, většina z nich se nevstřebá, ale naopak oteče stranou, kde už nemůže plnit funkci přenašeče energie (Redon et al., 2017). Naopak volný povrch půdy, vegetace a vodní plochy umožňují vstřebání velkého množství vody, která zůstává a může latentním tokem vyrovnávat teplotní extrémy (Zhang and Liang, 2018; Zhang et al., 2018). Z volné půdy a vodních těles je voda evaporována. Množství vypařené vody závisí na tepelné kapacitě tělesa, tepelné vodivosti, velikosti větru (výměně vzduchu) a dalších faktorech.

Biotická pumpa

Srážení a vypařování vody nad stromy/lesem, může mít vliv i na transport vody z oceánů nad pevninu. Tento princip je popsán jako biotická pumpa (Makarieva and Gorshkov, 2007) (Obrázek 5). Vypařená voda z oceánu později kondenzuje na vegetaci, steče po ní, je zadržena a svedena do půdy. Z půdy je zase stromy transpirována do atmosféry a horizontálně se posouvá směrem do vnitrozemí díky kondenzaci. Tak vegetace působí ovlivněním vodní bilance proti aridizaci prostředí a erozi (Sheil, 2018).



Obrázek 5: Schématicky znázorněné vytváření proudění vzduchu mezi oceánem a lesem díky kondenzaci. Ráno (a) je atmosféra suchá (béžová barva) a když vyjde slunce, rostliny začínají vydávat vodní páru (modré vertikální šipky). Během dne (b) a (c) se vlhkost shromáždí nad lesem (modrá barva) do doby, než zkondenzuje. Změna skupenství lokálně sníží tlak vzduchu a nasává tak i vlhký vzduch z oceánu (horizontální šipky). Voda vydávaná lesem spadne zpět v podobě srážek i s vodou evaporovanou z vodní hladiny. Převzato z: (Sheil, 2018)

Vegetace dělá půdu propustnější, a tak může půda vstřebat více dopadajících srážek, zároveň zachycuje horizontální srážky jako je mlha a rosa (Lu et al., 2018). Zpřístupňuje vodu pro evaporaci kořenovým systémem, který čerpá vodu z větší hloubky a transpirací zvyšuje množství vypařené vody, a tím množství energie odnímané ze zahřátého povrchu (Bennett and Barton, 2018). Přispívá k tvoření konvektivních oblaků, které zvyšují albedo atmosféry, takže i když vegetace samotná má celkem nízké albedo, díky oblakům se tento fakt stává zanedbatelným (Aragao, 2012). Přítomnost vegetace zadržuje vodu a zabraňuje vzniku aridních oblastí (Bennett and Barton, 2018). Vegetační pokryv může mít vliv na teplotu v globálním měřítku. Rostliny také půdu stíní a transpirací regulují teplotu, a tak vytváří neobyčejně příznivé mikroklimatické podmínky.

Globální zvyšování teploty je často přičítáno zvýšené koncentraci skleníkových plynů, jako je oxid uhličitý, metan, oxid dusný a vodní pára (Zhao and Pitman, 2002). Skleníkové plyny propouští krátkovlnné záření přicházející ze slunce směrem na Zemi, ale už nepropouští dlouhovlnné (tepelné) záření ze Země zpět do atmosféry a odrážejí ho opět k povrchu (Barcza, 2017). Do atmosféry je CO₂ uvolňován především spalováním fosilních paliv, odlesňováním a dalším spalováním (např. odpadu, topení) (Cheung and Jim, 2018).

Rostliny čerpají CO₂ z atmosféry a fotosyntézou jej přeměňují na organické sloučeniny (sacharidy), sloužící jako základní stavební jednotky rostlinného těla a poskytující potravu heterotrofním organismům. Do konce života ukládají (sekvestrují) uhlík (Anderson et al., 2011). Nejvíce uhlíku tak zadržují dlouholeté a mohutné rostliny – stromy. Pokud dojde ke spálení či rozkladu rostlinného těla, je uhlík opět uvolněn do atmosféry v podobě CO₂. Nejvíce uhlíku pojmají oceány, ale ani vegetace nemá ve světovém měřítku zanedbatelnou roli, může pojmát až třetinu celkového CO₂. Stromy tak přispívají ke globální uhlíkové bilanci a k redukci skleníkových plynů (Bala et al., 2007). Tím i k ovlivnění globální teploty (Anderson et al., 2011; Jackson et al., 2008). V lokálním měřítku mají však na konkrétní teplotu větší vliv jiné faktory, než globální koncentrace CO₂, například nedostatek vody, nebo stínu a také geografické umístění. Funkcí vegetace a stromů ve městě se zabývá spíše v lokálním měřítku, proto se problematikou globálního cyklu uhlíku dále nebudu zabývat.

4 Stromy ve městě

Vegetace je součástí měst už od doby vzniku prvních z nich. Člověk jí určuje místa, kde může růst, dává ji do květináčů, zahrad a parků a vybírá druhy podle jejich estetických vlastností. V posledních letech jsou však rostliny oceňovány i pro další funkce, které mohou plnit v městských ekosystémech.

Ekosystémové služby je koncept, který se snaží vyčíslit finanční hodnotu ekosystémů (Costanza et al., 1997). Snaží se vypočítat celkovou finanční bilanci, počítá cenu ekosystému a případně škody, které způsobí, a vyvažuje je pozitivním vlivem na zdraví lidí a prevencí různých onemocnění. Dále funkcí ekosystému jako protektivního prostředku například proti povodním

a jimi způsobeným škodám. Je to složitý přístup, kde hraje roli mnoho faktorů a každý ho může pojmát trochu jinak, a tak se jím nebudu zabývat podrobněji.

Dále se věnuji hlavně funkcím stromů ve městech. Jsou to velké, dlouhověké organismy, účinně regulující svou transpiraci a poskytující stín. Lépe a ve větší míře tak mohou ovlivňovat mikroklima i mezoklima města než jiné typy vegetace. Zároveň ve spojení s ostatní vegetací, keři a trávou, se jejich chladivý účinek zvyšuje, stejně jako efekt zadržování vody.

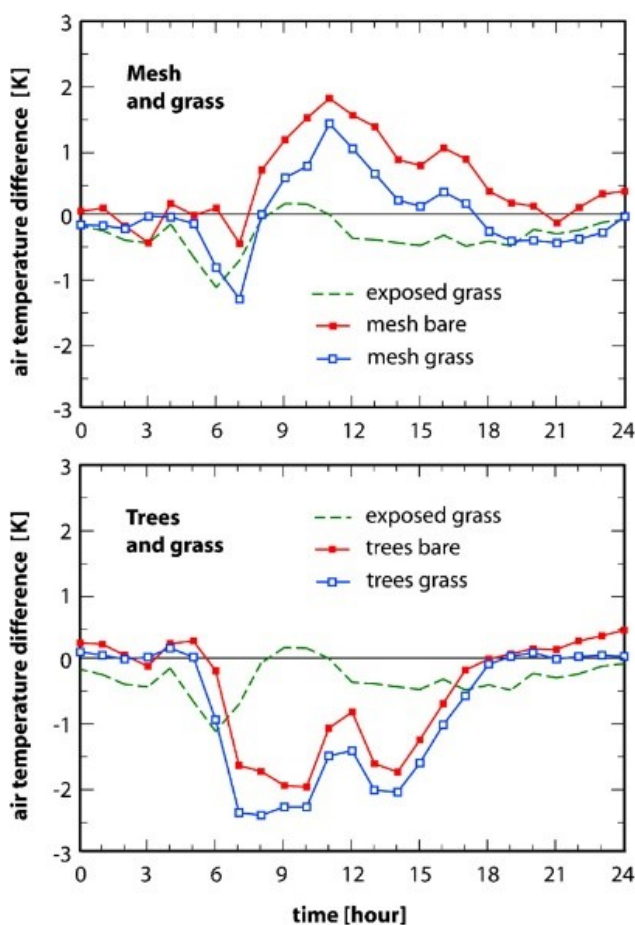
4.1 Funkce stromů ve městě

Stínění, chlazení, zadržování vody a konvektivní srážky

Stromy působí pozitivně pro zmírnění UHI efektu. Ochlazují své okolí nejen stínem vytvořeným korunou, odražením/absorpcí okolního krátkovlnného záření z budov a povrchu (Redon et al., 2017; Shashua-Bar et al., 2009), ale zejména fyziologickými procesy evapotranspirace (viz 3.2 Evapotranspirace).

Studie (Shashua-Bar et al., 2009) například zkoumá vliv vegetace na teplotu v semi-aridních podmínkách města. Porovnává různé povrchy, jejich kombinace a stínidla. Tři měřená místa byla na 70 % povrchu pokryta dlaždicemi, přičemž zbytek, 30 %, byla odkrytá půda. Jedno z těchto míst bylo ve středové části stíněno stromy, *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. a *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze. Další bylo stíněno polyesterovou černou sítí, s třicetiprocentní propustností světla, což by mělo odpovídat stínění koruny stromů. Rozsah i geometrie stínící sítě byla co nejvíce podobná parametrům stínu vytvořeného stromy. Třetí, poslední místo, zůstalo nestíněno. Tři místa, porovnávaná s těmito, byla pokryta krátkostébelným typem trávniku Durban. Durban trávník byl vybrán pro svou schopnost růst ve stínu s minimálním poškozením, při pouhých 3 hodinách přímého slunečního záření za den. Trávník byl umístěn pod stromy a pod stínidla. Zavlažování stromů a trávy zajišťovaly dva nezávislé zavlažovací systémy naprogramované tak, aby vegetace nebyla omezená v transpiraci. Teploty na těchto místech byly měřeny po 45 dní v letním období současně s měřením mikroklimatických změn a spotřebou vody. Byla pozorována teplota, relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru, vše v závislosti na čase. Výdej vody stromy byl relativně nízký oproti exponovanému trávniku. Společná evapotranspirace stromů a jimi stíněné trávy byla nižší, než evapotranspirace exponované nestíněné trávy.

Důležitým údajem získaným z měření byla relativní účinnost ochlazování jednotlivými strukturami v průběhu dne. Nejvíce se efekt ochlazování projevil přes den, kombinací povrchu trávníku stíněného stromem (Graf 2).



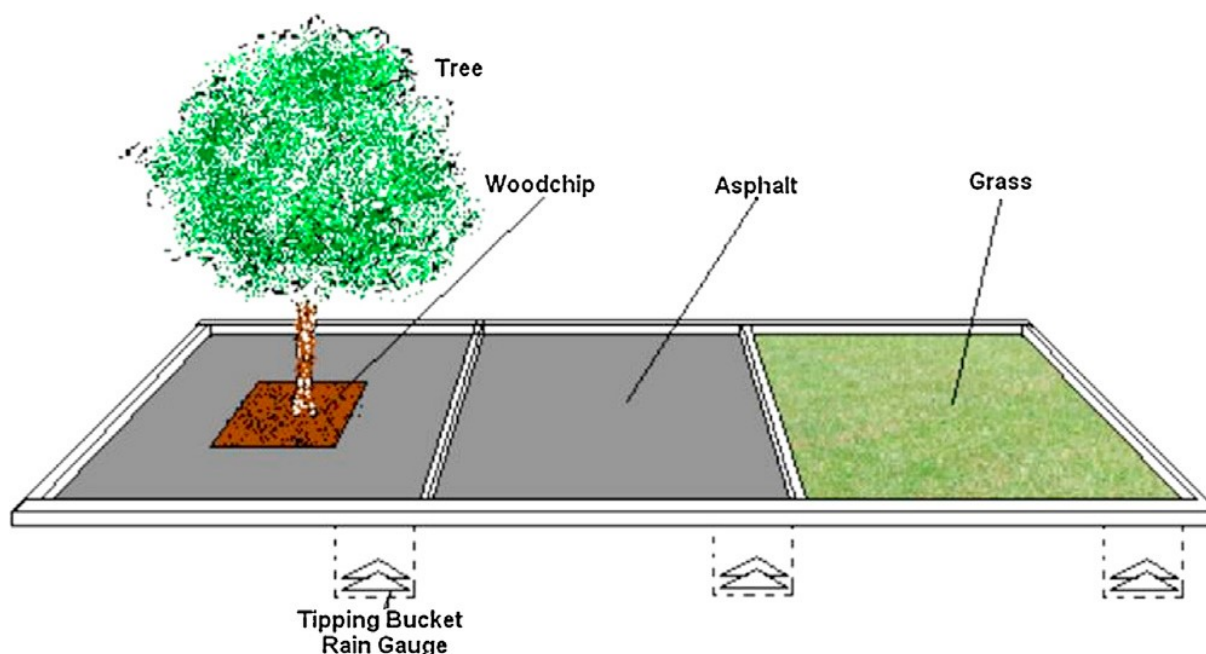
Graf 2: Znázornění rozdílu teploty vzduchu v závislosti na čase naměřené ve stínu síťoviny (nahore) a ve stínu stromu (dole). Stíněná země (červená) a stíněný trávník (modrá) se liší ve způsobu stínění a i v rozdílu teplot, exponovaný trávník (zelená) vykazuje stejnou teplotu. Efekt chlazení byl nejvyšší u trávníku, který byl stíněn stromem. Převzato z: (Shashua-Bar et al., 2009)

Voda může být, díky evaporaci a evapotranspiraci, největším nositelem tepelné energie, a tím ovlivňovat celkovou teplotu. Její nepřítomnost teplotu zvyšuje. Ve výše citované studii byly zavlažovány rostliny, ale nebyly zavlažovány dlaždice. Z mokrých dlaždic exponovaných slunečnímu záření by se voda vypařovala, vznikala by tak tok latentního tepla a snížil by tok zjevného tepla, a tím i naměřenou teplotu nad exponovanými dlaždicemi. Po dešti by byla mokrá jak vegetace, tak i dlaždice. Ovšem, je nutno vzít na vědomí, že vegetace je zase schopna pojmout více vody, zatímco z dlaždic voda odteče. Dále je ve studii pro stínění použita černá síť, která sice propouští 30 % záření, podobně jako stromy, ale má jinou barvu. Pohlcování a odrazení záření u černého a zeleného tělesa je rozdílné, a tak se tato tělesa mohou i zahřívat na jinou teplotu – opět je tím ovlivněno měření zjevného tepla. Na druhou stranu, černá síť byla suchá, zatímco vegetace obsahuje hodně vody, která absorbuje ve specifických

spektrech a má relativně vysokou tepelnou kapacitu a vodivost. Otázkou je, zda tyto faktory mohou signifikantně ovlivnit výsledky studie, nebo je možné je zanedbat.

Z údajů o relativní účinnosti ochlazování je patrné, že zejména stromy ovlivňují městské mikroklima a výrazně zlepšují tepelný komfort chodců a obyvatel (Redon et al., 2017).

Stromy a vegetace obecně zadržují více vody než nepropustné povrchy města, protože kořeny zvyšují porozitu půdy a zmenšují tím odtok. Vliv přítomnosti vegetace na odtok srážek z povrchů ve městě byl porovnáván např. v Britském Manchesteru (Armson et al., 2013). Byly stanoveny plochy o rozměru 9 m², které byly pokryty trávou, asfaltem a asfaltem se zasazeným stromem (Obrázek 6).



Obrázek 6: Tři plochy s různými povrchy, odtok z nich byl měřen a porovnáván. Nejvyšší odtok byl z asfaltu, nejvíce vody dokázala zadržet tráva neudusaná chodci. Převzato z: (Armson et al., 2013)

Tráva téměř úplně zadržuje vodu, stromy a místa, kde jsou zasazeny, redukuje odtok vody z asfaltu, a to nejen zadržováním, ale i vsakem do pěstební jámy. Pokus probíhal od ledna do září roku 2011 na plochách s otevřeným povrchem, aby pokrytí vegetací nebránilo srážkám. První testovací pole bylo pokryto asfaltem, druhé pole bylo pokryto drny s výsevem směsi Amenity a posekáno a třetí pole bylo asfaltové se stromem *Acer campestre* L. v pěstební jámě o rozměru 1x1 m v centru. Půda v pěstební jámě byla o 3 cm níže, než asfalt, a tak byla úroveň

dorovnána dřevěnou drtí. Všechna pole byla zatěsněna a obehnána 3 cm obrubníkem. Vegetace byla vybrána tak, aby co nejvíce odpovídala pěstovaným druhům v místě pokusu. Stromy byly v podobném věku 7-9 let, s podobnou pokryvností koruny, výškou, LAI (indexem listové plochy; plocha listů vztažená na 1m² povrchu země) a v půdě s obsahem stavebního materiálu, po velký obsah organických částic. Tyto tři plochy byly vždy blízko sebe. V jejich okolí byly změřeny meteorologické podmínky. Z těchto dat byly vynechány dny, kdy nespádly žádné srážky a zbytek byl rozdělen na letní a zimní srážky. Z množství spadlé a zadržené vody byl vypočten denní odtok. Výsledky této studie ukazují odtok z asfaltu v zimě: 62%, v létě 53%. Odtok z plochy se stromem v zimě: 26%, v létě 20%. Takže odtok jen z čistého asfaltu snižují o 58% v zimě a o 62% v létě. A odtok z travnaté plochy v zimě i v létě méně než 1%. Toto ukazuje signifikantní rozdíl mezi povrchy, a to nehledě na sezónu. Tráva infiltruje hodně vody do půdy, která ale musí být propustná. Pokud je ušlapaná, odtok je větší. Z asfaltu zmizí hodně vody, ale ne všechna odteče. Vypařeno a zadrženo ve struktuře asfaltu je 1%. Plochy se stromy redukuje odtok z asfaltu asi o 60% a to nehledě na sezonní rozdíly. To ukazuje na infiltraci do pěstební jámy. Tento pokus však probíhal s relativně malým množstvím vody. Otázka je, jaký by byl odtok, kdyby došlo k saturaci půdy vodou a jak by reagovaly stromy se zaplaveným kořenovým systémem.

Studie z Nanjingu, Číny, (Yang and Zhang, 2011), se zabývá infiltrací vody do různých městských povrchů, jejím vlivem na odtok a kvalitu povrchové vody. Jako největší problém v městském prostředí bylo v této studii zaznamenáno zkompaktnění půdy. Kompaktnost povrchu zabraňuje infiltraci a zvyšuje tak odtok. Nejvíce zhuťněné půdy jsou ty, které jsou využívány městem po nejkratší dobu, starší půdy vykazují větší porozitu, a tím i větší schopnost infiltrovat vodu. Zhuťnění půdy je způsobeno například pokrytím asfaltem nebo udupáním chodci. Míra infiltrace závisí na čase, intenzitě a délce srážek i fyzikálních vlastnostech půdy, jako na objemové hustotě, celkové porozitě, podílem půdních pórů vyplněných vzduchem, kapilární porozitě, na obsahu organické hmoty, písku, bahna a jílu v půdě. Zároveň také na jejím využívání, přítomnosti a typu vegetace. Výsledky studie ukazují jen malé rozdíly mezi infiltrací v parku, kampusu a u stromů lemujících ulici. Naopak finální infiltrace byla signifikantně vyšší, když byly stromy v kombinaci s trávou, kam byl zakázán vstup chodcům, nebo s keři. Stromy mají totiž velké a objemné kořeny, které mohou uvolnit zhuťnělou půdu a mohou pomoci při formování půdních makropórů a stabilní půdní struktury. K odtoku dochází, když je intenzita

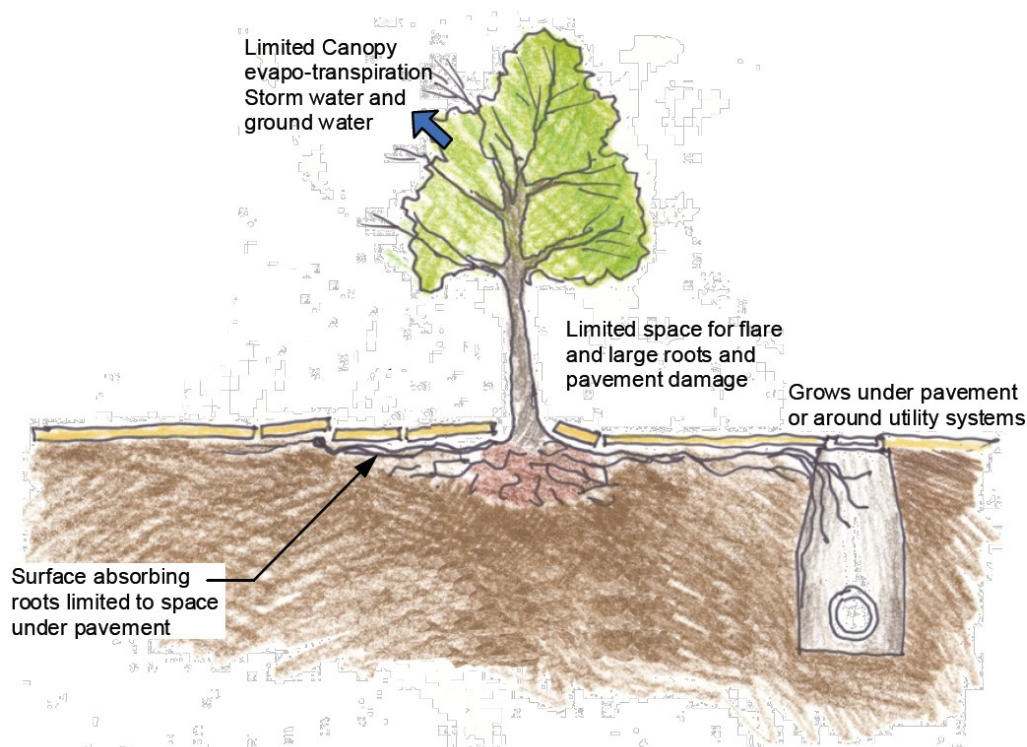
srážek vyšší, než rychlost a velikost infiltrace. Kvalita vody při vysokém odtoku nebo záplavách nebyla příliš dobrá. Byla znečištěna NO_3^- , NH_4^+ , celkovým množstvím dusíku, celkovým množstvím fosforu a pevnými částicemi. Toto znečištění bylo vyšší při odtoku z městského prostředí, než z lesa. Malá infiltrace ovlivňuje městské prostředí a jeho environmentální podmínky. Působí vysoký odtok či povodně a rapidně snižuje kvalitu vody.

Koruna a kmen stromu vodu během deště absorbují a zadrží do doby, než se vypaří, nebo se vstřebá do půdy (Seitz and Escobedo, 2014). Dospělý listnatý opadavý strom dokáže zadržet až 1 893 - 2 650 litrů vody za rok (Cappiella and others 2005). Stromy zvyšují evapotranspiraci, a tím přispívají ke vzniku konvektivních oblaků. Tak ovlivňují klima na regionální úrovni díky zvýšení pravděpodobnosti konvektivních srážek. Druhotný efekt na teplotu daného místa je pak zvýšení albeda právě díky oblakům (viz *Albedo*) (Bala et al., 2007).

Škody způsobené kořeny a prevence

Pěstování stromů ve městech může mít za následek poškození infrastruktury chodníků, silnic a parkovišť (Mullaney et al., 2015). Pokud se totiž nedostává kořenům voda, snaží se růst tam, kde by mohla být, a tím pak proráží nepropustný povrch, aby mohly vodu čerpat. Zároveň nejvyšší koncentrace živin je zpravidla v prvních 50 cm půdy. A tak kořeny rostou především tam (Bengough et al., 2011; Puhe, 2003). Poškozování infrastruktury, nadzvedávání chodníků a dláždění (Obrázek 7), je nejčastější argument pro odstranění stromu v inkriminovaném místě (Kirkpatrick et al., 2012).

Prevenčí pro tento problém by mohlo být včasné zastřížení koruny, volba druhu a použití propustnějších materiálů pro městské povrchy. Kdyby se voda totiž vsákla do půdy a protekla hlouběji, kořeny by rostly spíše směrem dolů – za odtokem (Mullaney and Lucke, 2014).

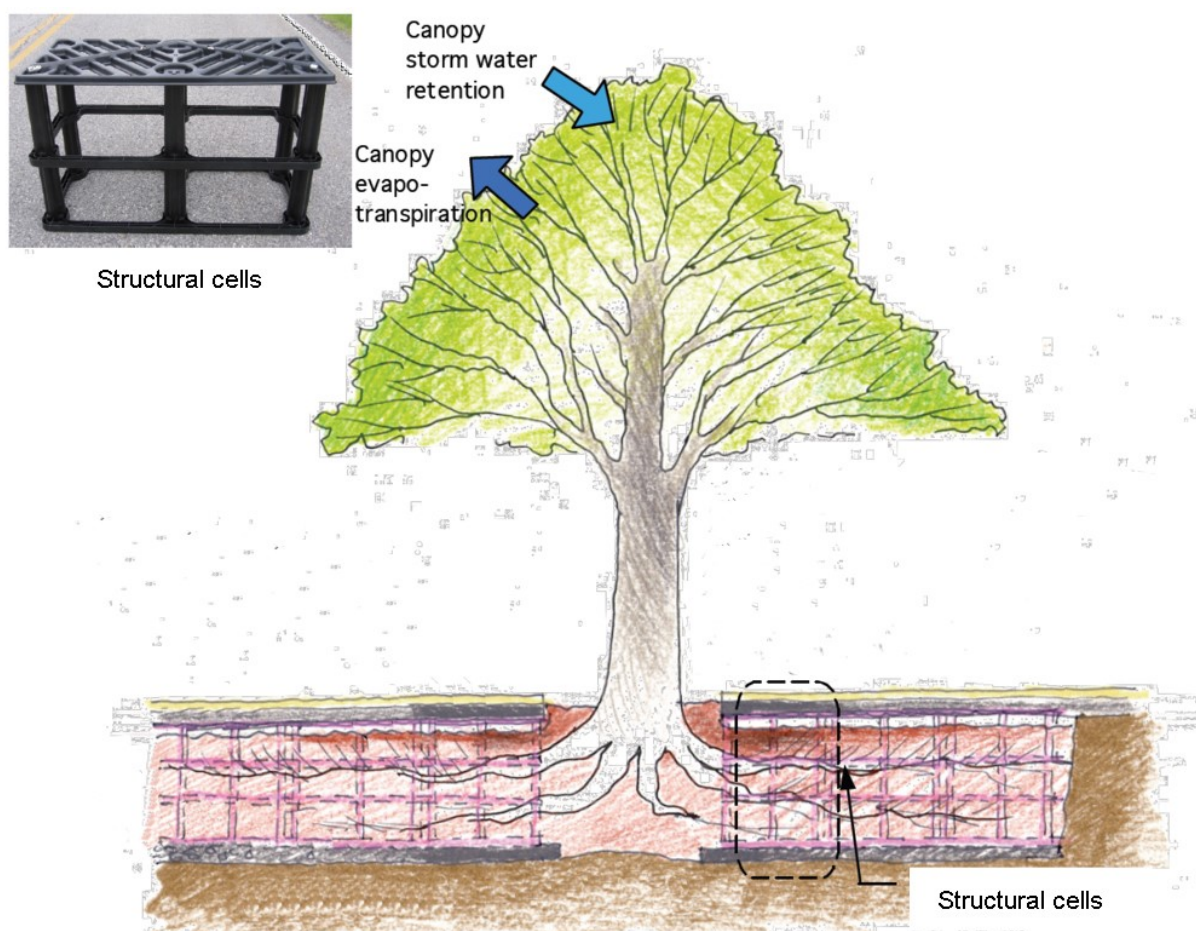


Obrázek 7: Strom ve městě, limitovaný mnoha faktory (znečištění vzduchu, porozita půdy, prostor, vstřebávání vody, půdní respirace atd.), je nucen zlepšit své životní podmínky např. růstem kořenů, a tím způsobuje škodu lidmi vystavěným strukturám. Převzato a upraveno dle: (James Urban [online])

Stromy, jejich fyziologický stav a městské prostředí

Růst stromů závisí na faktorech vnějšího prostředí, jako např. vlhkost půdy, limitaci prostorem (objem půdy), porozita půdy a její chemické vlastnosti, osvětlení koruny a kvalita vzduchu (Iakovoglou et al., 2001). Život ve městě pro ně může být tedy dost stresující. Městská vegetace trpí například zvýšenou okolní teplotou, zasolením, zvýšeným obsahem těžkých kovů v půdě a znečištěním vzduchu zejména prachovými částicemi, oxidy dusíku, oxidy síry a troposférickým ozonem, produkovanými dopravou a průmyslem (Mullaney et al., 2015). Blíže se budu věnovat zasolení a vzdušnému znečištění.

Zasolení půd je často příčinou špatného stavu stromů ve městě a jejich zvýšené mortality. (Ordóñez-Barona et al., 2018) se zabýval tímto faktorem ve studii, kde byly zvoleny dvě revitalizované lokality pro sbírání dat o kondici stromů a listů a odebírání vzorků půdy. Byly zvoleny dvě ulice stejně orientované, kde byly při revitalizaci instalovány strukturální jednotky zadržující vodu, jako preventivní opatření proti povodním a zároveň pro zadržování vody a tím zlepšení podmínek pěstovaných stromů.



Obrázek 8: Strukturální jednotky zabudované do země pro zlepšení infiltrace, retence vody a životních podmínek městských stromů. Převzato a upraveno dle: (James Urban [online])

V jedné z nich byly vzorky rozděleny sezónně – a to před solením chodníků, v sezóně solení (v zimě) a po sezóně. Do půdy byly také umístěny senzory pro měření elektrokonduktivity (dále jen EC) a hladiny sodíku. Sběry dat o kondici stromů probíhaly během dvou let. Byly určeny parametry pro rozřazení do kategorií, a to odumírání stromů od špiček, změna barvy listu, snížení olistění koruny a poškození větví. Podle těchto vlastností byl stav stromů rozdělen do čtyř kategorií: mrtvé, ve špatném, v přiměřeném a v dobrém stavu. Výsledky ukázaly, že

stromy v dobrém stavu, rostly v půdě s menšími hodnotami EC a sodíku. Strukturální jednotky zabudované pod zemí zadržovaly vodu, ale také těžké kovy a soli stékající spolu s vodou z povrchů. Salinita půd ve městě je sezónně proměnlivá, naměřené hodnoty překračovaly hodnoty odhadované pro poškození stromů. Zvýšená salinita měla prokazatelný vliv na fyziologický stav stromů a poškození jejich listů. Stromy jsou komplexní dlouhověké organismy, které na zátěž nereagují hned, a jejich fyziologický stav je ovlivněn mnoha dalšími faktory. Výběr druhů stromů pěstovaných v tak náročném prostředí je také důležitý, druhu s nižší a střední tolerancí zasolení může toto způsobit osmotický a ionický stres, dehydrataci, poškození fotosyntetického aparátu a urychlení stárnutí listů. *Ulmus americana* L. a *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch jsou tolerantní na obsah solí v půdě. Tolerance stromu ke stresu zasolením závisí však také na délce vystavení danému stresu. Také se může časem ukázat, že i tyto stromy budou vykazovat chronický stres. Tolerance stromů ke stresovým faktorům městského prostředí závisí i na jejich přirozeném areálu rozšíření a na geografické poloze místa pěstování. Kumulace solí během jednoho roku v půdě není zřejmá a nemá jasný dopad na fyziologický stav stromů, proto je potřeba problematiku zkoumat v delším časovém horizontu.

Znečištění vzduchu a jeho dopadu na fyziologický stav stromů se věnuje studie (Mukherjee and Agrawal, 2018). Autoři se zaměřili na reakci stromů na vzdušné znečištění ve vztahu k funkčním vlastnostem listu a vybraným charakteristikám stromů. Snažili se posoudit jednotlivý i kombinovaný efekt polutantů na 13 druhů tropických stromů. Znečištění, které bylo měřeno, obsahovalo prachové částice PM₁₀, celkové množství rozptýlených částic (TSP), SO₂, NO₂ a O₃. Areály ve městě Váránasí, Indie, ve kterých studie probíhaly, byly tři – průmyslový, dopravní a obytný. Studie probíhala dva roky. Především hodnoty PM₁₀ a NO₂ převyšovaly během studie limitní hodnoty dané místními standardy ministerstva životního prostředí. Mezi funkcemi listu mělo znečištění největší efekt na neenzymatické antioxidanty a fotosyntetické pigmenty. Z vybraných polutantů největší stres vyvolávalo PM₁₀, pak O₃. Sezónní efekt působil spíše na znečištění prachovými částicemi, než na znečištění plyny, s výjimkou O₃, jeho hodnoty byly nejvyšší během léta, kdy je sluneční záření nejintenzivnější. Zatímco hodnoty PM₁₀ jsou nejvyšší v zimě, kdy se spaluje nejvíce paliv. Při vyšších hodnotách znečištění se v listech sledovaných stromů zvýšila hladina neenzymatických antioxidantů, jako jsou polyfenolické látky a kyselina askorbová, která v apoplastu funguje jako první obrana proti reak-

tivním formám kyslíku. Při zvýšeném znečištění byl pozorován nárůst celkového množství chlorofylu u 8 druhů o 19-85%. Zatímco u ostatních 5 sledovaných druhů hodnota celkového chlorofylu poklesla o 17-50%. Rozdíly ve funkčních vlastnostech listů byly signifikantně způsobeny zátěží ze znečištění a sezónou. Druhy jsou na znečištění různě citlivé. Největší problém způsobují PM₁₀ a O₃. Opadavé stromy s menší až střední korunou oválného tvaru jsou tolerantnější ke znečištění vzduchu, než stromy s jiným habitem.

Úspora energie

Působením na zmírnění UHI efektu se stromy podílí i na šetření energie a snížení spotřeby fosilních paliv (Pandit and Laband, 2010). V zimě omezují rychlost větru a zvyšují tak pocitovou teplotu, a tím dochází ke snížení spotřeby energie (Zhang et al., 2018). V létě svým stínem a evapotranspirací šetří energii na klimatizaci. Zvýšení plochy pokryté vegetací, jako jsou parky nebo zahrady, ve městě o 10% vede ke snížení roční spotřeby energie o 5 - 10%, mluvíme-li o temperátních oblastech (McPherson et al.). Snížením spotřeby fosilních paliv stromy omezují rychlost uvolňování CO₂ do ovzduší, zároveň CO₂ sekvestrují, a tak mohou ovlivnit klima na globální úrovni (Mullaney et al., 2015).

Znečištění vzduchu a hluk

Koruny stromů poskytují velkou plochu listů na relativně malou plochu půdy nebo země. Díky velké ploše, mohou ze znečištěného ovzduší města absorbovat škodlivé plyny a malé částice, které snižují kvalitu ovzduší. Stromy absorbují ozon, CO₂, oxidy dusíku, síry a prachové částice. U opadavých stromů, které shazují listy, se navíc tyto látky dají odstranit/odklidit spolu s listy (Fusaro et al., 2017; Tallis et al., 2011). Jehličnaté stromy absorbují dobře prachové částice, zatímco listnaté absorbují více ozonu. Stromy také zmírňují šíření hluku ve městě (např. z dopravy) a mohou fungovat jako zvuková bariéra (Bertram and Rehdanz, 2015).

Biodiverzita

Město je specifický ekosystém obývaný jak flórou, tak faunou. Je vytvořený člověkem. Mnoho druhů, dříve žijících ve volné přírodě, se stalo synantropními, tzn. žijící v těsné blízkosti člověka, jeho obydlí. Druhy, které se městu přizpůsobit nedokázaly, z krajiny mizí, protože urbanizace má čím dál větší efekt i na své okolí (Sushinsky Jessica R. et al., 2013). Vegetace ve městě pěstovaná člověkem má vliv i na druhovou skladbu živočichů a celkovou biodiverzitu městského ekosystému a jeho podmínky. Pěstování různorodé původní druhové skladby

stromů je doporučeno proti homogenizaci městské fauny (Alvey, 2006; Ikin et al., 2013). Druhově bohaté ekosystémy se zdají být stabilnější (Tilman David, 1996).

4.2 Stromy a lidé

Městská zeleň má pozitivní dopad na život obyvatel města. Celkově zkvalitňuje životní podmínky prostředí. Působí protektivně na zdraví lidí. Především jedná-li se o srdeční choroby a potíže s dýcháním (Donovan et al., 2013).

Tato studie se zabývá vymizením jasanů v patnácti státech USA vlivem rozšíření invazivního škůdce krasce (*Agrilus planipennis*) během let 1990 až 2007 a jeho vlivem na mortalitu lidí. Vyšší mortalita lidí, především kvůli onemocnění respiračního traktu, byla signifikantní, avšak ještě v závislosti na délce zamoření daného regionu krascem a na příjmu domácnosti – tedy v případech, kdy příjem byl vyšší než průměrný. Data o mortalitě (získána z National Center for Health Statistic) byla rozdělena do skupin podle věku: < 18 a >18 a podle příčiny smrti (respirační, náhlá smrt a srdeční choroby). Data o přítomnosti krasce byla sbírána ze států, kde byl v roce 2010 potvrzený alespoň jeden případ přítomnosti krasce. Dopad uhynutí stromů v důsledku napadení krascem je závislý na přítomnosti *Fraxinu spp.* a jeho hojnosti. Takto obsáhlá data nebyla bohužel k dispozici, a tak byl počet stromů stanoven snímkováním koruny svrchu a druhově odlišen podle rozlohy koruny. Výsledky ukazují, že během 18 let studie, se mortalita spojená s respiračním traktem snižovala. Krasce měl větší vliv na mortalitu lidí, jejichž domácnosti mají vyšší příjem, než průměrný. To je v souladu s předchozími studiemi, které ukazují, že v bohatších okresech je více zeleně, a tak její vymizení má i větší vliv na jejich obyvatele. Stromy sice umírají po napadení krascem 6-7 let, avšak jeho rozšíření má vliv na člověka už od prvního roku, neboť mnoho stromů je preventivně z krajiny odstraněno. Vymizení jasanu není přímo asociováno se zvýšenou mortalitou související s kardiovaskulárním onemocněním, pouze v interakci s mediánem příjmu. Tato studie prokázala, konzistentně s předchozími studiemi, že smrt stromů má vliv na mortalitu lidí. Větší vliv mělo rozšíření škůdce na lidi žijící v okresech, kde příjem domácnosti je vyšší, než průměrný. To se dá vykládat různě – buď v bohatších čtvrtích mají lidé lepší přístup k jasanům, a tak na ně více působí i jejich smrt, anebo v bohatších čtvrtích je více zeleně, což působí na kvalitu vzduchu a smrt stromů má vyšší dopad na mikroklimatické podmínky. Není přesně zřejmé, proč stromy ovlivňují mortalitu lidí,

ale je pár relevantních důvodů: zlepšují kvalitu vzduchu, snižují stres, zvyšují fyzickou aktivitu a zmírňují extrémní teploty.

Stromy pozitivně působí na psychiku obyvatel a poskytuje prostor vhodný ke sportovním aktivitám a k sociálnímu kontaktu (Bertram and Rehdanz, 2015; van Dillen et al., 2012).

5 Závěr

Sluneční záření, vodu, zemi i vzduch často vnímáme jako samozřejmost. Jako obnovitelný zdroj, který můžeme čerpat a využívat podle libosti až do skonání věků. Tyto čtyři živly neodmyslitelně patří k planetě Zemi a k životu na ní. Tvoří jakousi uzavřenou soustavu, kde se hmota neztrácí a soustava komunikuje pouze výměnou energie slunečního záření a vyzařování tělesa-planety, která je v dynamické rovnováze. Hmota se neztrácí a energie je v rovnováze, ale ani tak nemusí být zaručeny vhodné podmínky pro život, jak jej známe nyní. To závisí totiž na rozložení hmoty i energie. Toto rozložení naopak často v rovnováze není. Člověk svým způsobem života, především využíváním povrchu, mění energetické toky. Přírodní vegetace je odstraňována, aby místo ní mohlo vzniknout parkoviště, nebo sklady. Mokřady zadržující vodu a regulující povodně jsou vysušovány, aby na jejich místě mohla vzniknout pole. Voda obíhá v dlouhých hydrologických cyklech a v mořích, místo toho, aby byla zadržována v půdě a v podobě podzemní vody. Sluneční energie je bez dostatku vody až příliš často přeměněna na zjevné teplo, místo toho, aby vytvářela proud tepla latentního a společně s vodou působila kontinentální srážky. Úrodné půdy jsou často vytěženy a vázány v biomase, která se pálí a zůstává v atmosféře v podobě CO₂, místo toho, aby byla kompostována a opět vrácena do země. Trendem se, působením člověka, staly dlouhodobé cykly daleko přesahující život jedince. Možná v kontextu „co oči nevidí, to srdce nebolí“, nebo „po nás ať přijde potopa“. Následkem jsou pozitivně - zpětnovazebné kruhy či spirály jako: vyšší teplota působí sucho a sucho působí vyšší teplotu (příkladem jsou pouště, i nově vznikající), nebo: čím více se zavlažuje kvůli suchu, tím větší sucho to způsobí (příkladem jsou řeky Syrdarja, Amudarja, a vyschlé Aralské jezero). Vznikají extrémy a disbalance, jako jsou sucho - povodně, horko - mráz. To pozorujeme i v mírném pásmu, kde je vody relativně dost.

Vegetace může hrát v této problematice až překvapivě velkou roli. Stává se nejlepší technologií a nejúčinnějším nástrojem na zlepšení životních podmínek v lokálním i v globálním mě-

řítku. Díky evapotranspiraci ochlazuje své okolí a ve městech může zastávat funkci účinné klimatizace vystavěné z obnovitelných zdrojů, poháněné výhradně slunečním zářením a jako chladivé médium používající vodu, kterou navíc čistí (transpirací - destilací). Oproti technologickým zařízením, je to nejudržitelnější způsob řešení. Vegetace ve městě navíc poskytuje i další výhody, jako zadržování vody v krajině, zvýšení množství srážek, zmírnění přímého slunečního záření stínem, zadržování prachového znečištění a hluku, má i funkce estetické a působí na zmírňování stresu. Vytváří chybějící rovnováhu jak v tocích energie, ve výměně plynů, tak i v hydrologických cyklech.

Otázkou je, zda jí člověk dovolí tuto roli plnit.

6 Seznam zdrojů a použité literatury

Akbari, H., Menon, S., and Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Clim. Change* 94, 275–286.

Alvey, A.A. (2006). Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban For. Urban Green.* 5, 195–201.

Anderson, R.G., Canadell, J.G., Randerson, J.T., Jackson, R.B., Hungate, B.A., Baldocchi, D.D., Ban-Weiss, G.A., Bonan, G.B., Caldeira, K., Cao, L., et al. (2011). Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Front. Ecol. Environ.* 9, 174–182.

Aragao, L.E.O.C. (2012). ENVIRONMENTAL SCIENCE The rainforest's water pump. *Nature* 489, 217–218.

Armson, D., Stringer, P., and Ennos, A.R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban For. Urban Green.* 12, 282–286.

Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T.J., Lobell, D.B., Delire, C., and Mirin, A. (2007). Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104, 6550–6555.

Barcza, S. (2017). Greenhouse effect from the point of view of radiative transfer. *Acta Geod. Geophys.* 52, 581–592.

Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., and Valentine, T.A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68.

Bennett, B.M., and Barton, G.A. (2018). The enduring link between forest cover and rainfall: a historical perspective on science and policy discussions. *For. Ecosyst.* 5, 5.

Bertram, C., and Rehdanz, K. (2015). The role of urban green space for human well-being. *Ecol. Econ.* 120, 139–152.

Betts, R.A. (2000). Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408, 187–190.

Bonan, G.B. (1997). Effects of Land Use on the Climate of the United States. *Clim. Change* 37, 449–486.

Bonan, G.B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320, 1444–1449.

Bretz, S., Akbari, H., and Rosenfeld, A. (1998). Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmos. Environ.* 32, 95–101.

Cheung, P.K., and Jim, C.Y. (2018). Comparing the cooling effects of a tree and a concrete shelter using PET and UTCI. *Build. Environ.* 130, 49–61.

Coakley, J.A. (2003). Reflectance and albedo, surface (Academic).

Cappiella and others (2005) citováno podle: Seitz, J., and Escobedo, F. (2014). Urban Forests in Florida: Trees Control Stormwater Runoff and Improve Water Quality. 5.*

Costanza, R., d'Arge, R., deGroot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.

van Dillen, S.M.E., de Vries, S., Groenewegen, P.P., and Spreeuwenberg, P. (2012). Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health: adding quality to quantity. *J. Epidemiol. Community Health* 66, e8.

Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Gatzliolis, D., and Mao, M.Y. (2013). The Relationship Between Trees and Human Health Evidence from the Spread of the Emerald Ash Borer. *Am. J. Prev. Med.* 44, 139–145.

Fusaro, L., Marando, F., Sebastiani, A., Capotorti, G., Blasi, C., Copiz, R., Congedo, L., Munafo, M., Ciancarella, L., and Manes, F. (2017). Mapping and Assessment of PM10 and O-3 Removal by Woody Vegetation at Urban and Regional Level. *Remote Sens.* 9, 791.

Georgescu, M., Chow, W.T.L., Wang, Z.H., Brazel, A., Trapido-Lurie, B., Roth, M., and Benson-Lira, V. (2015). Prioritizing urban sustainability solutions: coordinated approaches must incorporate scale-dependent built environment induced effects. *Environ. Res. Lett.* 10, 061001.

Gunawardena, K.R., Wells, M.J., and Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Sci. Total Environ.* 584, 1040–1055.

Iakovoglou, V., Thompson, J., Burras, L., and Kipper, R. (2001). Factors related to tree growth across urban-rural gradients in the Midwest, USA. *Urban Ecosyst.* 5, 71–85.

Ikin, K., Knight, E., Lindenmayer, D.B., Fischer, J., and Manning, A.D. (2013). The influence of native versus exotic streetscape vegetation on the spatial distribution of birds in suburbs and reserves. *Divers. Distrib.* 19, 294–306.

Jackson, R.B., Randerson, J.T., Canadell, J.G., Anderson, R.G., Avissar, R., Baldocchi, D.D., Bonan, G.B., Caldeira, K., Diffenbaugh, N.S., Field, C.B., et al. (2008). Protecting climate with forests. *Environ. Res. Lett.* 3.

Kirkpatrick, J.B., Davison, A., and Daniels, G.D. (2012). Resident attitudes towards trees influence the planting and removal of different types of trees in eastern Australian cities. *Landsc. Urban Plan.* 107, 147–158.

Lee, T.-W., Choi, H.S., and Lee, J. (2014). Generalized Scaling of Urban Heat Island Effect and Its Applications for Energy Consumption and Renewable Energy. *Adv. Meteorol.* 948306.

* Sekundární citace

- Lu, C., Zhao, T., Shi, X., and Cao, S. (2018). Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China. *J. Clean. Prod.* *176*, 1213–1222.
- Makarieva, A.M., and Gorshkov, V.G. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* *11*, 1013–1033.
- McPherson, E.G., Nowak, D.J., and Rowntree, R.A. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. 211.
- Mukherjee, A., and Agrawal, M. (2018). Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* *152*, 42–54.
- Mullaney, J., and Lucke, T. (2014). Practical Review of Pervious Pavement Designs. *Clean-Soil Air Water* *42*, 111–124.
- Mullaney, J., Lucke, T., and Trueman, S.J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landsc. Urban Plan.* *134*, 157–166.
- Naeem, S., Cao, C., Waqar, M.M., Wei, C., and Acharya, B.K. (2018). Vegetation role in controlling the ecoenvironmental conditions for sustainable urban environments: a comparison of Beijing and Islamabad. *J. Appl. Remote Sens.* *12*, 016013.
- Oke, T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environ.* *1967* *7*, 769–779.
- Ordóñez-Barona, C., Sabetski, V., Millward, A.A., and Steenberg, J. (2018). De-icing salt contamination reduces urban tree performance in structural soil cells. *Environ. Pollut.* *234*, 562–571.
- Pandit, R., and Laband, D.N. (2010). Energy savings from tree shade. *Ecol. Econ.* *69*, 1324–1329.
- Pokorny, J. (2001). Dissipation of solar energy in landscape - Role of vegetation, impact of drainage on local climate, policy implication (Leiden: Backhuys Publishers).
- Pokorný, J., Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, and Fakulta životního prostředí (2014). Hospodaření s vodou v krajině - funkce ekosystémů.
- Puhe, J. (2003). Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands - a review. *For. Ecol. Manag.* *175*, 253–273.
- Qiu, G., Li, H., Zhang, Q., Chen, W., Liang, X., and Li, X. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *J. Integr. Agric.* *12*, 1307–1315.
- Redon, E.C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., and Musy, M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geosci. Model Dev.* *10*, 385–411.

Sarapatka, B., Abrahamova, M., Cizkova, S., Dotlacil, L., Hluchy, M., Kren, J., Kuras, T., Lastuvka, Z., Lososova, Z., Pokorny, E., et al. (2010). *Agroekologie: východiska pro udržitelné zemědělské hospodaření* (Olomouc, Czech Republic: Bioinstitut).

Seitz, J., and Escobedo, F. (2014). Urban Forests in Florida: Trees Control Stormwater Runoff and Improve Water Quality. 5.

Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., and Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landsc. Urban Plan.* 92, 179–186.

Sheil, D. (2018). Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle. *For. Ecosyst.* 5, 19.

Sushinsky Jessica R., Rhodes Jonathan R., Possingham Hugh P., Gill Tony K., and Fuller Richard A. (2013). How should we grow cities to minimize their biodiversity impacts? *Glob. Change Biol.* 19, 401–410.

Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., and van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Build. Environ.* 83, 65–78.

Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., and Freer-Smith, P. (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landsc. Urban Plan.* 103, 129–138.

Tayanc, M., and Toros, H. (1997). Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey. *Clim. Change* 35, 501–524.

Tayyebi, A., Shafizadeh-Moghadam, H., and Tayyebi, A.H. (2018). Analyzing long-term spatio-temporal patterns of land surface temperature in response to rapid urbanization in the mega-city of Tehran. *Land Use Policy* 71, 459–469.

Tilman David (1996). Biodiversity: Population Versus Ecosystem Stability. *Ecology* 77, 350–363.

Wu, Z., and Chen, L. (2017). Optimizing the spatial arrangement of trees in residential neighborhoods for better cooling effects: Integrating modeling with in-situ measurements. *Landsc. Urban Plan.* 167, 463–472.

Yang, J.-L., and Zhang, G.-L. (2011). Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *J. Soils Sediments* 11, 751–761.

Zhang, Y., and Liang, S. (2018). Impacts of land cover transitions on surface temperature in China based on satellite observations. *Environ. Res. Lett.* 13, 024010.

Zhang, C.L., Chen, F., Miao, S.G., Li, Q.C., Xia, X.A., and Xuan, C.Y. (2009). Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. *J. Geophys. Res.-Atmospheres* 114, D02116.

Zhang, L., Zhan, Q., and Lan, Y. (2018). Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Build. Environ.* 130, 27–39.

Zhao, M., and Pitman, A.J. (2002). The impact of land cover change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1078.

Zuvela-Aloise, M., Andre, K., Schwaiger, H., Bird, D.N., and Gallaun, H. (2018). Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theor. Appl. Climatol.* 131, 1005–1018.

Internetové zdroje

Nathalie Shanstrom (2016). New Research on the Impact of Trees on the Urban Heat Island Effect. News Research by Ledda Marritz [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.deepproot.com/blog/blog-entries/new-research-on-the-impact-of-trees-on-the-urban-heat-island-effect>

James Urban: Slashcards: Urban Trees as a Stormwater Utility [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.jamesurban.net/flashcards/>

Hill, E. (2017). The Types and Distribution of Terrestrial Biomes [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.trunity.net/sample_textbook/view/article/51cbf3977896bb431f6ad71f/

Cohesion of Water [online]. [cit. 2018-05-06] Dostupné z: <http://bio1151.nicerweb.com/Locked/media/ch03/cohesion.html>